

# ESTUDIO DEL EFECTO DEL MÉTODO DE CORTE SOBRE LA INICIACIÓN DE FISURAS Y LA VIDA EN FATIGA DEL ACERO S355M

T. García<sup>1</sup>, S. Cicero<sup>1,\*</sup>, I. Carrascal<sup>1</sup>, J.A. Alvarez<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, Av/ Los Castros s/n, 39005, Santander, Cantabria, España.

\* E-mail: ciceros@unican.es

## RESUMEN

Este artículo analiza el efecto del método de corte tanto en la iniciación de fisuras como en la vida en fatiga del acero S355M. El estudio contempla tres métodos de corte de gran trascendencia en ingeniería (plasma, laser y oxicorte) y dos geometrías de probeta diferentes: probetas de sección rectangular con corte a ambos lados, y probetas con lados mecanizados y corte de un agujero en la sección central. Todas las probetas se llevaron a rotura por fatiga en una máquina de resonancia, con una relación de tensiones (R) de 0.1, obteniéndose la curva S-N correspondiente a cada combinación de método de corte y geometría de probeta. La iniciación de fisuras se ha estimado mediante el análisis de la evolución de la frecuencia de resonancia de cada probeta. Los resultados muestran que para este acero en particular existe una influencia significativa del método de corte tanto en el tiempo de iniciación como en la vida en fatiga.

**PALABRAS CLAVE:** Fatiga, corte, acero S355M.

## ABSTRACT

The paper analyses the influence of the cutting processes on both the fatigue crack initiation and the fatigue life of S355M steel specimens. This research considers three significant cutting methods for the industry (plasma cutting, laser cutting and oxyfuel cutting) and two different types of specimens: those having a rectangular cross section with a cut edge on each side, and those having mechanised edges and a cut hole in the center of the cross section. All tests were carried out in a resonance machine under axial loading with stress ratio  $R=0.1$ . One S-N curve was obtained for each combination of cutting method and specimen geometry. The crack initiation was estimated analysing the fatigue test resonance frequency evolution of each specimen. For the steel grade considered, the results obtained show that the cutting method influences both the fatigue crack initiation and the fatigue life.

**KEYWORDS:** Fatigue, cutting system, S355M

## 1. INTRODUCCIÓN

Todo componente fabricado en acero y empleado en sectores como la construcción (puentes, estructuras metálicas o maquinaria), industria naval y calderería, es sometido, previamente a su ensamblaje final, a operaciones de transformación intermedias. El objeto de las mismas es proporcionarle la geometría necesaria, ya que el material suministrado por las acerías presenta dimensiones, por lo general, estandarizadas. Las alternativas principalmente empleadas por la industria, y objeto de estudio en el presente artículo, se engloban dentro de los denominados sistemas de corte térmico:

oxicorte o corte con llama, corte con plasma y corte con láser.

La diferencia principal entre los tres sistemas radica en cómo se lleve a cabo la fusión del material. El oxicorte se basa en la formación de óxidos de hierro, los cuales, al presentar un punto de fusión inferior al del material base, pueden ser arrastrados por el impacto de un chorro de oxígeno a alta presión. El corte con plasma consigue la fusión del material al alcanzarse temperaturas de hasta 30.000°C en el arco eléctrico que se forma entre el elemento de corte y la pieza. Finalmente, en el corte con láser, la fusión es provocada por la concentración de un

haz con elevada densidad de energía en un punto sobre o justo debajo de la superficie del material.

Bajo cargas estáticas, las propiedades del material no dependen en gran medida de la calidad de la superficie. Sin embargo, cuando se investiga su comportamiento frente a cargas dinámicas, es bien conocido que los sistemas de corte térmico afectan de manera muy significativa a la vida en fatiga [1]. La topografía de la superficie, las tensiones residuales y los cambios microestructurales son los parámetros del material que experimentan una modificación tras la realización de un corte en un componente de acero [2].

Entre los sistemas de corte térmico, el oxicorte es el tradicionalmente adoptado por la industria. Sin embargo, en la actualidad, tanto el corte con plasma como el corte con láser, representan una alternativa firme frente al sistema de corte tradicional, tanto por su mayor productividad como por la calidad del corte. Este hecho no encuentra reflejo en la normativa actual, la cual, en la mayor parte de los casos, solo considera el oxicorte, y en caso de contemplar también las otras dos alternativas, establece criterios por lo general muy conservadores y basados en las calidades obtenidas con el oxicorte. Esta observación es especialmente significativa en la normativa que rige el comportamiento a fatiga de un componente con superficies de corte libres. En algunos documentos como la BS 7608: 1993 [3], el Eurocódigo 3 [4], o el IIW [5], solo proponen valores de diseño a fatiga para detalles estructurales que presentan superficies oxicrotadas; mientras que en otras, como la BS 5400-6: 1999 [6], el Steel Construction Manual [7] o el Bridge Welding Code [8], se establecen limitaciones extremadamente conservadoras para las otras dos alternativas de corte térmico, como puede ser la restricción del incremento de la dureza por encima de un determinado valor.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Material

Para esta investigación se ha elegido un acero S355M suministrado en chapas laminadas de 2000 mm por 2500 mm y 15 mm de espesor. El motivo por el cual se ha seleccionado esta tipología de acero y espesor es su uso extensivo en la construcción de puentes, edificación, maquinaria y calderería. Se trata de un acero de bajo carbono laminado en caliente con una composición química nominal que se recoge, junto a sus propiedades mecánicas, en la Tabla 1. Como se muestra en la Figura 1, el acero S355M presenta una microestructura hipoeutéctica, formada por ferrita poligonal (granos más blancos en la imagen) y bloques de perlita, con un tamaño de grano igual a  $6.44 \mu\text{m}$  (obtenido según la ASTM E112 [9]). Así mismo, se observa un bandeamiento de la microestructura con los bloques de perlita paralelos a la dirección de laminación, lo cual es muy habitual en los aceros

laminados. Es conveniente señalar que el material presenta segregación central.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas del acero S355M

Composición química							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
.14	.35	1.35	.015	.008	.021	.002	.021
Al	Cu	Nb	N	Sn	Ti	V	CEV
.03	.015	.025	.004	.002	.002	.004	.37
Propiedades mecánicas							
Módulo de Elasticidad (GPa)		Límite Elástico (MPa)		Tensión de Rotura (MPa)			
205.35		426.6		559.17			

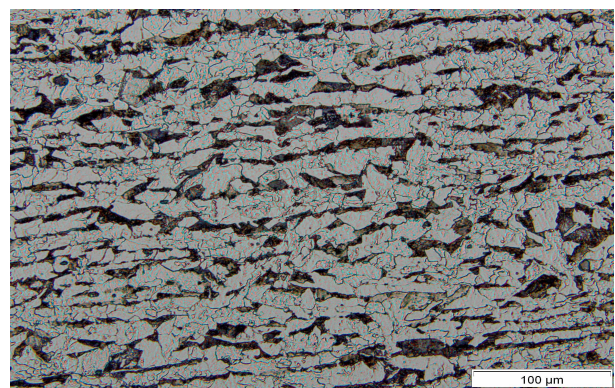


Figura 1. Microestructura ferrítico-perlítica del acero S355M

### 2.2. Procedimientos de corte térmico

Para poder realizar un estudio comparativo completo, se han adoptado las tres alternativas de corte térmico empleadas en la actualidad. Con el objeto de que la calidad del corte fuese lo más representativa posible de la realidad, las probetas fueron fabricadas con los parámetros de corte normalmente adoptados por la industria para el acero y espesor considerados. A modo de ejemplo, en la Figura 2 se muestra el proceso de fabricación de las probetas por oxicrote. Los valores de los parámetros de corte según cada uno de los tres procedimientos se recogen en las tablas 2 a 4.



Figura 2. Obtención de las probetas por oxicrote.

Tabla 2. Parámetros – oxicorte

Parámetro	Valor	
Velocidad de corte	0.45-0.5 m/min	
Presión de propano	0.4 bar	
Presión de oxígeno	Pre	1.2 bar
	Corte	6 bar

Tabla 3. Parámetros – corte con plasma

Parámetro	Valor	
Corriente del arco	200 A	
Voltaje del arco	131V	
Velocidad de corte	2.2 m/min	
Altura de la antorcha	4.1 mm	
Gas plasma: Flujo de oxígeno	Pre	24 l/min
	Corte	69 l/min
Gas auxiliar: Flujo de aire	Pre	65 l/min
	Corte	28 l/min
Tiempo de perforación inicial	0.6 s	
Altura de la antorcha en la perforación inicial	8.2 mm	

Tabla 4. Parámetros – corte con laser

Parámetro	Valor
Energía	3600 W
Velocidad de corte	1 m/min
Diámetro de la boquilla	1.7 mm
Altura de la boquilla	0.5-0.8 mm
Diámetro del foco	0.2 mm
Posición del foco	Sobre la superficie
Gas auxiliar	Oxígeno
Presión del gas auxiliar	0.6 bar

### 2.3. Evaluación de la vida a fatiga

Como parámetros comparativos de la vida a fatiga se han seleccionado tanto las curvas S-N como el valor de la endurance. Cumpliendo con las especificaciones de ASTM E739-10 [10], por cada curva S-N se han empleado 10 probetas. Así mismo, se han seleccionado dos geometrías distintas. Por un lado, para reproducir las condiciones en superficies de corte rectas, se ha adoptado una de las tipologías recogidas en la normativa ASTM E466-96 [11], Figura 3, con el corte objeto de evaluación paralelo a la dirección de laminación. Por otro lado, para simular la presencia de agujeros en componentes, se ha diseñado una probeta con un agujero en el centro, Figura 4; dada la ausencia de este tipo de probetas en la normativa actual, ha sido necesario recurrir a otros diseños propuestos en la bibliografía [12, 13]. Del mismo modo, las probetas con agujero han sido obtenidas en la dirección de laminación. Conviene señalar que, para la fabricación de las mismas, se ha tomado la precaución de adoptar como inicio del corte uno de los dos extremos del diámetro paralelo a la dirección de aplicación de las cargas.

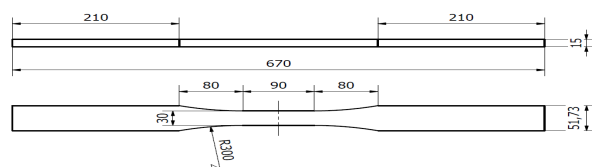


Figura 3. Esquema de la geometría de las probetas con el corte recto (cotas en mm).

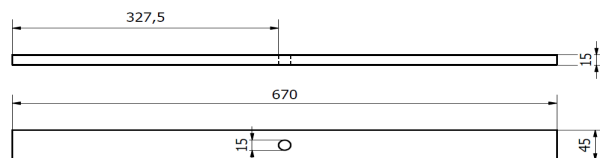


Figura 4. Esquema de la geometría de las probetas con agujero (cotas en mm).

Los ensayos de fatiga han sido realizados con una máquina de alta frecuencia de 400KN de capacidad, la cual permite llevar a cabo los ensayos a la frecuencia de resonancia de la probeta, que para las dos tipologías empleadas oscila entre 77 y 79 Hz. Respecto a la relación de cargas, se ha seleccionado un valor de  $R=0.1$ , siendo este el más empleado en la bibliografía (ej., [14, 15]) y constituyendo una solución de compromiso para la evaluación de este tipo de componentes tanto en puentes como en maquinaria de construcción. Finalmente, se ha considerado como valor de endurance aquel para el cual se han alcanzado  $10^7$  ciclos.

El método adoptado para la determinación del inicio de la fisura por fatiga se basa en la observación de un cambio en la frecuencia de resonancia durante el ensayo [16]. Esta metodología se sustenta en que la aparición de una grieta provoca una reducción de la sección transversal de la probeta, y con ello una disminución de su rigidez, lo cual lleva asociado una reducción en la frecuencia de resonancia de la pieza [17]. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de la variación de la frecuencia a lo largo de uno de los ensayos realizados. Como se puede comprobar, el punto considerado como iniciación se corresponde con un incremento en la velocidad con la que disminuye la frecuencia de resonancia, lo cual está asociado a una reducción de la rigidez de la probeta por la pérdida de sección transversal al iniciarse la fisura.

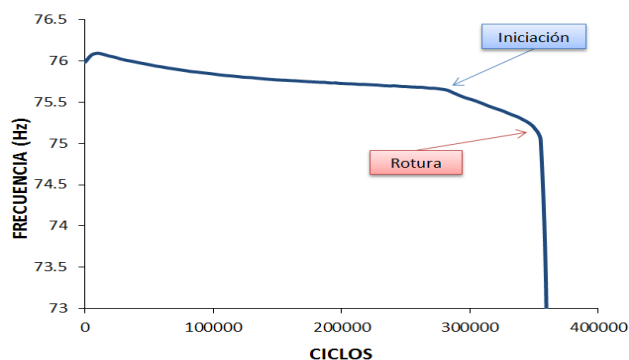


Figura 5. Ejemplo de la variación de la frecuencia de resonancia a lo largo de un ensayo.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Probetas con corte recto

En la Figura 6 se muestran las curvas S-N obtenidas para las probetas con el corte recto

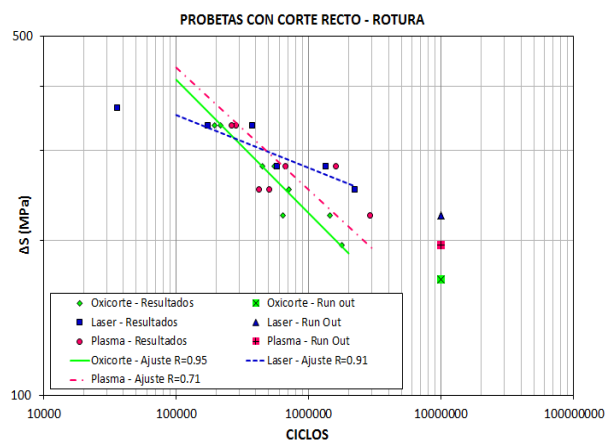


Figura 6. Curvas S-N obtenidas para los tres métodos de corte analizados y probetas con corte recto.

La primera observación que se puede realizar es la mejora en el comportamiento a fatiga que permiten obtener el corte con plasma y láser respecto del oxicorte para la fatiga de alto número de ciclos (HCF): para  $10^6$  ciclos, el corte con plasma y láser permiten incrementar en 25 MPa y 50 MPa respectivamente la resistencia a fatiga respecto de la obtenida con el oxicorte. En el caso de la endurancia, los resultados obtenidos son similares a los anteriormente descritos: el corte con plasma consigue aumentar el valor del oxicorte en un 20%, y el corte con láser en un 30%. Por el contrario, para la fatiga de número medio de ciclos (MCF), la tendencia anterior se invierte, siendo el láser el que proporciona un peor comportamiento a fatiga: para  $10^5$  ciclos y tomando como referencia la resistencia a fatiga obtenida con el oxicorte, el corte con láser presenta una disminución de 60 MPa, mientras que el corte con plasma mantiene un aumento de 23 MPa.

En la Figura 7 se recogen las curvas S-N correspondientes a la iniciación.

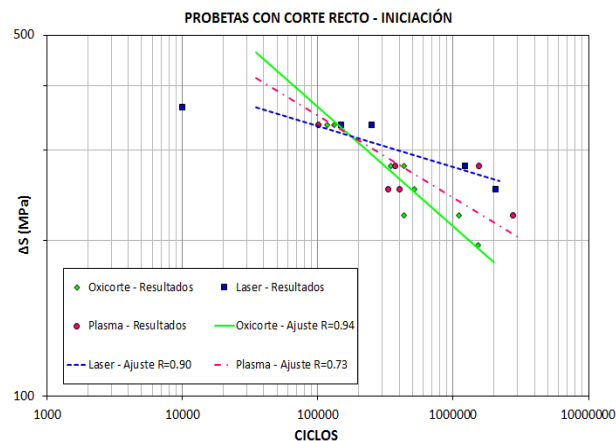


Figura 7. Curvas S-N de iniciación obtenidas para los tres métodos de corte y probetas con corte recto.

Se observa un comportamiento muy similar al mostrado por las curvas S-N de rotura: para HCF, tanto el láser como el plasma permiten incrementar el tiempo de iniciación conseguido con el oxicorte. Sin embargo esta tendencia se invierte para MCF, y es el sistema de corte tradicional, oxicorte, el que permite conseguir unos mejores resultados.

Para poder comparar los resultados obtenidos en el presente programa experimental con los valores recogidos en la normativa actual, se han seleccionado tres normativas de amplio uso en la actualidad: el Eurocódigo 3 [4] y el IIW [5], para el diseño a fatiga de estructuras de acero, y la ASSHTO [18], de aplicación exclusiva al diseño a fatiga de puentes. Conviene señalar que tanto la clase FAT125 de [4, 5] como la categoría A de [18] se corresponden con material oxicotado a máquina con estrías de corte regulares y poco profundas, ya que en ninguna de estas normativas se contempla la calidad de corte correspondiente a los otros dos sistemas de corte térmico. En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos y las normativas contempladas.

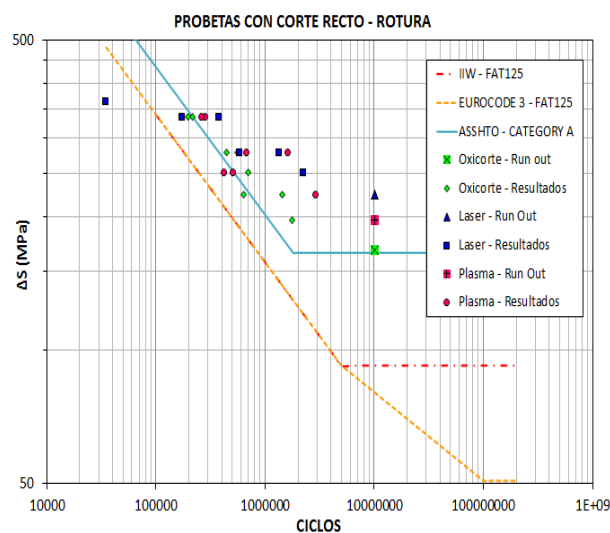


Figura 8. Comparación entre resultados experimentales y las propuestas por las normativas.

En primer lugar, si se comparan las tres curvas propuestas por las normativas consideradas con los resultados del oxicorte, para el cual son de aplicación, se observa como en el tramo inclinado proporcionan valores de diseño bastante ajustados, especialmente la ASSHTO [18]; sin embargo, en lo que respecta a la endurancia, tanto el Eurocódigo 3 [4] como el IIW [5] proporcionan valores muy del lado de la seguridad. En segundo lugar, extrapolando la aplicación de las normativas anteriormente citadas al comportamiento en fatiga de componentes cortados con plasma y láser, se comprueba que, para un número de ciclos superior a  $10^6$ , se debería tener en cuenta el incremento de la capacidad resistente a fatiga que proporcionan los dos métodos de corte térmico alternativos, ya que, en caso contrario, los análisis resultarían excesivamente conservadores. Por el contrario, para un número de



ciclos inferior a  $2 \cdot 10^5$ , la aplicación a componentes cortados con láser de las normativas analizadas en este artículo proporciona valores del lado de la inseguridad. Este hecho ya había sido apuntado por otros autores [14,19], sin embargo, conviene señalar que el uso no seguro de las normativas se corresponde con niveles de tensión en torno al 90% del límite elástico, valores que, por lo general, son alcanzados en pocas ocasiones durante la vida útil de una estructura; de hecho la normativa BS 7608:1993 [3] limita la validez de sus curvas a tensiones inferiores al 60% del límite elástico en condiciones normales y al 80% en condiciones extremas. Por lo tanto, la normativa actual no solo no debería establecer ninguna restricción en cuanto al empleo del corte con plasma y láser por fatiga, sino que debería tener en cuenta la mejora, sobre todo para la fatiga de alto número de ciclos, que se consigue con estos sistemas alternativos de corte térmico.

### 3.2. Probetas con agujero

En la Figura 9 se recogen las curvas S-N obtenidas para las probetas con un agujero en la zona central. El primer aspecto que llama la atención es el hecho de que, al contrario que ocurría con las probetas de corte recto, el oxicorte es el que muestra mejor comportamiento frente a fatiga. Por el contrario, el corte con láser es el que proporciona peores resultados. Comparando el comportamiento a fatiga obtenido con el corte con láser y plasma, ambos presentan valores muy próximos en la zona inclinada de la curva S-N, sin embargo el corte con láser provoca una disminución de 56 MPa en el valor de la endurance si se toma como referencia el obtenido con el corte con plasma, lo cual supone una reducción del 50%.

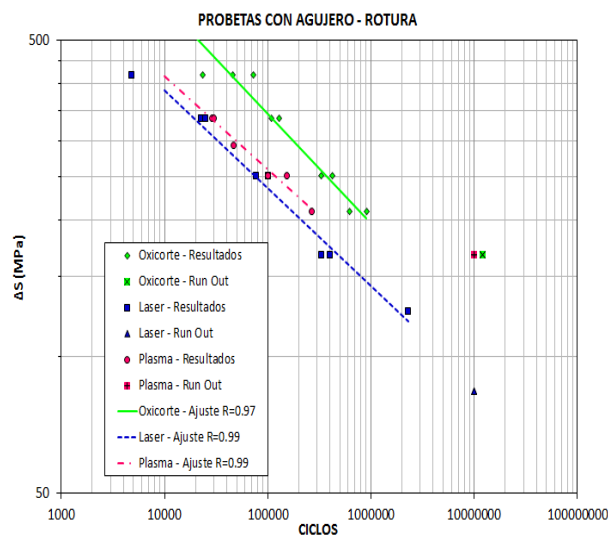


Figura 9. Curvas S-N obtenidas para los tres métodos de corte analizados y probetas con agujero.

Como se observa en la Figura 10, las curvas S-N de iniciación obtenidas para las probetas con agujero vuelven a reflejar el comportamiento ya mostrado por las de rotura, siendo el oxicorte el que proporciona una mayor resistencia a fatiga.

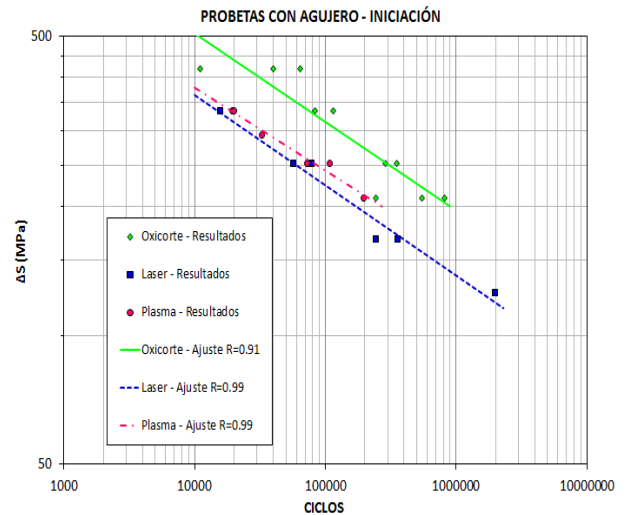


Figura 10. Curvas S-N de iniciación obtenidas para los tres métodos de corte y probetas con agujero.

Respecto a la existencia de normativa que regule el comportamiento a fatiga de un componente con un orificio perforado, tanto la ASSHTO (Categoría D) [18] como el Eurocódigo 3 (FAT 90) [4] consideran este detalle constructivo. Sin embargo, las curvas S-N propuestas han sido obtenidas para orificios realizados bien por taladrado o bien por punzonado, pero en ningún caso mediante corte térmico. Como se puede comprobar en la Figura 11, la curva propuesta por la normativa ASSHTO [18] es más conservadora que la homóloga correspondiente al Eurocódigo 3 [4], por lo que será necesario comparar por separado los resultados obtenidos con ambas normativas. En primer lugar, tomando como referencia el Eurocódigo 3 [4], se observa como el oxicorte proporciona siempre resultados conservadores, con una especial mejora de la endurance. En cuanto a las otras dos alternativas de corte, únicamente presentan valores del lado de la seguridad en lo que respecta a la fatiga de alto número de ciclos. En segundo lugar, comparando los resultados obtenidos con los propuestos por la ASSHTO [18], tanto el oxicorte como el corte con plasma mejoran el comportamiento a fatiga propuesto por dicha normativa. De hecho, consiguen incrementar el valor de la endurance en 120 MPa. El corte con láser proporciona valores conservadores para la fatiga de alto número de ciclos, mejorando en un 75% el límite a fatiga propuesto por la normativa. Por el contrario, presenta valores ligeramente del lado de la inseguridad para un número de ciclos inferior a  $2 \cdot 10^4$ ; sin embargo, desde un punto de vista práctico, la importancia de este hecho es relativa, ya que se corresponden con unas tensiones próximas al límite elástico y a las cuales un componente de un puente correctamente diseñado llega, muy raramente, durante su vida útil.

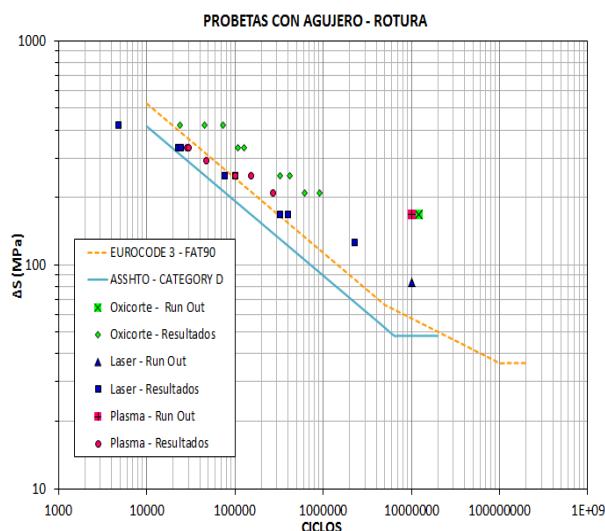


Figura 11. Comparación entre resultados experimentales y las propuestas por las normativas.

#### 4. CONCLUSIONES

Las alternativas de corte térmico disponibles en la actualidad por la industria, como son el corte con plasma y láser, mejoran el comportamiento en fatiga de los componentes que presentan un corte recto realizado por oxicorte, tanto desde el punto de vista de la rotura como de la iniciación de fisuras por fatiga. Por el contrario, los componentes con orificios realizados por oxicorte presentan un comportamiento a fatiga mejor que el obtenido con las otras dos técnicas de corte térmico.

La normativa actualmente desarrollada para el cálculo de la vida en fatiga de componentes que presentan bordes rectos es extremadamente conservadora, especialmente en la fatiga de alto número de ciclos. Así mismo, las curvas S-N propuestas por las normativas para agujeros perforados podrían hacerse extensibles a orificios realizados mediante corte térmico.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Comisión Europea la financiación del proyecto HIPERCUT: "High Performance Cut Edges in Structural Steel Plates for Demanding Applications", de cuyos resultados se deriva este artículo.

#### REFERENCIAS

[1] Meurling F., Melander A., Linder J., Larsson M., "The influence of mechanical and laser cutting on the fatigue strengths of carbon and stainless sheet steels", *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 30, p.p. 309–319, 2001.

[2] Thomas D. J., "The influence of the laser and plasma traverse cutting speed process parameter on the cut-edge characteristics and durability of Yellow Goods vehicle applications", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 13, pp. 120–132, 2011.

[3] BS 7608: 1993, "Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures", ed. by British Standards, 1993.

[4] UNE EN 1993-1-9: 2008, "Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero - Parte 1-9", ed. by Aenor, 2008.

[5] Hobbacher A., "Recommendations for fatigue design of welded joints and components", ed. Inter. Institute of Welding. XIII-1965-03/XV-1127-03, 2009.

[6] BS 5400-6: 1999, "Steel, concrete and composite bridges. Specifications for materials and workmanship, steel", ed. by British Standards, 1999.

[7] "Steel construction manual, 14<sup>th</sup> Ed.", ed. by American Institute of Steel Construction, 2010.

[8] AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2002, "Bridge welding code", ed. by American Welding Society, 2002.

[9] ASTM E112-12, "Standard test methods for determining average grain size", ed. by American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2012.

[10] ASTM E739-10, "Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain life ( $\epsilon$ -N) fatigue data", ed. by American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2010.

[11] ASTM E466-96, "Conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials", ed. by American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1996.

[12] EUR 22056<sup>EN</sup>, "Performance criteria for cold formed structural steels", ed. by RFCS publi., 2003.

[13] Schijve J., "Fatigue of structures and materials", *Springer*, 2009.

[14] Harris I. D., "Plasma arc cutting of bridge steels", National Cooperative Highway Research Program, Report 384, 1995.

[15] Jezernik N. et al, "The influence of plasma cutting process on the fatigue strength of high strength steel S960Q", *Key Engineering Materials.*, Vols. 348/9, pp. 669-672, 2007.

[16] Lorenzino P. Bermejo L., Navarro A., "Análisis de la frecuencia de resonancia de ensayos a fatiga como herramienta para determinar las etapas de iniciación y propagación de grietas", *Congreso del Grupo Español de Fractura*, 2013,

[17] Wagner V. et al., "Cyclic deformation behavior of railway wheel steels in the very high cycle fatigue regime", *International Journal of Fatigue*, Vol. 33, pp. 69-74, 2011.

[18] LRFDUS-6, "ASSHTO LRFD Bridge – Design Specifications", ed. by American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

[19] Amadioha A. U., "Fatigue performance of laser and plasma-cut edges", *Tata Steel RD&T*, R.S.N 152628, 2011.